

# Związki między podstawowymi jednostkami miar układu SI a podstawowymi stałymi fizycznymi

Jerzy Dudziewicz

*Podano związki (publikowane w ostatnich latach przez BIPM) między podstawowymi jednostkami miar układu SI a podstawowymi stałymi fizycznymi (wg CODATA, 1998). Zwrócono większą uwagę na następujące jednostki miar: amper, sekunda, metr i kilogram; oficjalna definicja kilograma jest dotychczas oparta na jednostce wzorca tej jednostki masy przechowywanego od 1889 r. w BIPM w Sèvres. Przedstawiono również pewne ogólne informacje dotyczące kelwina, mola i kandeli.*

*fizyka, metrologia*

## Wprowadzenie

W początkowym okresie rozwoju nowoczesnej metrologii, jaki przypada na drugą połowę XVIII wieku, jednostki miary i ich wzorce były oparte na ogół na **artefaktach**, które uważano za dostatecznie stałe, dokładne i wystarczające dla praktyki, mając na uwadze głównie handel, rzemiosło oraz początki rozwoju nauki i techniki [3]. Typowymi przykładami takich wzorców były: **metr** – jako długość wzorca końcowego, wykonanego ze stopu platyno-irydowego w postaci belki o przekroju w kształcie litery X, przechowywanego (do dnia dzisiejszego) w Międzynarodowym Biurze Miar w Sèvres pod Paryżem, a także **kilogram** – jako masa (zwana dawniej ciężarem absolutnym) wzorca, wykonanego ze stopu platyno-irydowego, przechowywanego (do dnia dzisiejszego) w Sèvres i traktowanego do chwili obecnej jako wzorec definiujący podstawową jednostkę miary masy w aktualnym układzie SI.

Z biegiem lat rozwój nauki i techniki oraz wymiany handlowej w skali całego globu ziemskiego spowodował, że tego typu wzorce jednostek miar i ich definicje nie mogły wystarczać do zachowania wymaganej jednolitości miar i obecnie obowiązujący w świecie układ SI [13, 16] w coraz większej mierze jest oparty na odpowiednim zbiorze **podstawowych stałych fizycznych** [10, 12, 20]. Te stałe fizyczne, według określenia prof. Macieja Suffczyńskiego [14], są to: „*wielkości, które charakteryzują ilościowo obiekty będące podstawą naszego pojmowania świata fizycznego. Rozwój fizyki atomowej i zrozumienie zasad mechaniki kwantowej doprowadziło do pojęcia stałych podstawowych jako zbioru niewielu wielkości, przez które wyrażają się wszystkie inne i które są w bardzo szerokich warunkach niezmiennie i wszędzie w dostępnej nam przestrzeni takie same*”.

## Wybrane zależności między jednostkami miar i stałymi fizycznymi

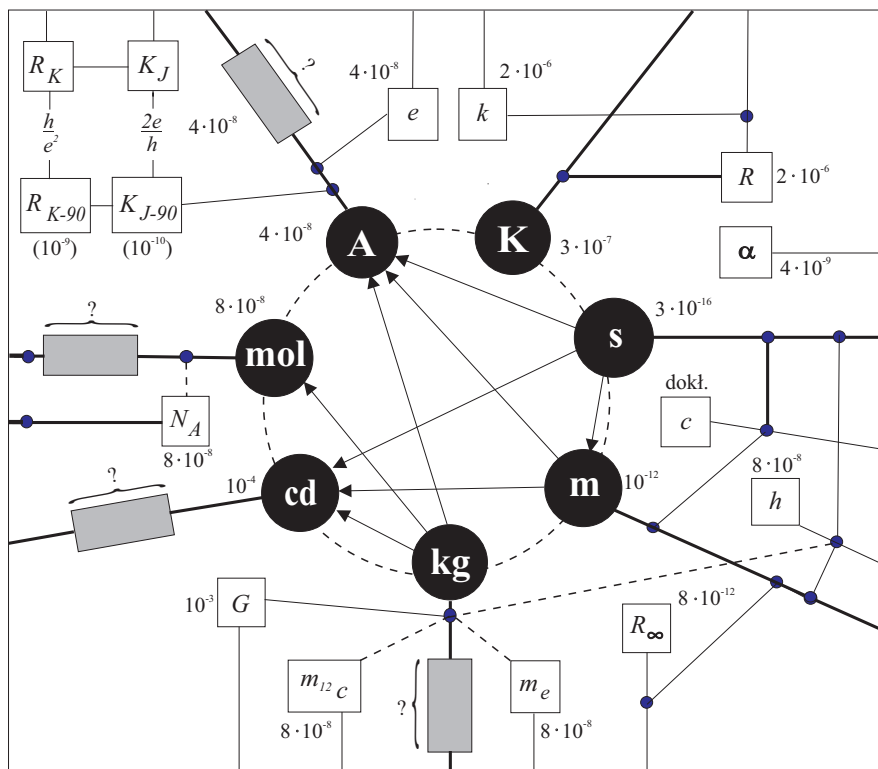
W tablicy 1 zestawiono wybrane podstawowe stałe fizyczne (według CODATA, 1998 [6]).

Na rys. 1 zaprezentowano natomiast graficznie sieć powiązań między podstawowymi jednostkami miary układu SI a niektórymi podstawowymi stałymi fizycznymi; dane te zaczerpnięto z prac [9, 10, 13, 20]. Linie ciągłe z grotami wewnątrz „koła” podstawowych jednostek miar układu SI,

Tabl. 1. Wybrane podstawowe stałe fizyczne (wg CODATA, 1998)

Oznaczenie	Nazwa	Wartość liczbowa	Względna niepewność standardowa
$\alpha = \mu_0 c e^2 / 2h$	Stała struktury subtelnej	$7,297\,352\,533 \cdot 10^{-3}$	$3,7 \cdot 10^{-9}$
$c$	Prędkość światła w próżni	$299\,792\,458 \text{ ms}^{-1}$	Wartość dokładna
$e$	Ładunek elementarny	$1,602\,176\,462 \cdot 10^{-19} \text{ C}$	$3,9 \cdot 10^{-8}$
$\epsilon_0 = 1/\mu_0 c^2$	Przenikalność elektryczna próżni	$8,854\,187\,817 \cdot 10^{-12} \text{ Fm}^{-1}$	Wartość dokładna
$G$	Newtonowska stała grawitacji	$6,673 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$
$h$	Stała Plancka	$6,626\,068\,76 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$	$7,8 \cdot 10^{-8}$
$k = R/N_A$	Stała Boltzmanna	$1,380\,650\,3 \cdot 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$	$1,7 \cdot 10^{-6}$
$K_J = 2e/h$	Stała Josephsona <sup>*)</sup>	$483\,597,898 \cdot 10^9 \text{ Hz V}^{-1}$	$3,9 \cdot 10^{-8}$
$m_e$	Masa spoczynkowa elektronu	$9,109\,381\,88 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$	$7,9 \cdot 10^{-8}$
$m_u, m_{12C}$	Zunifikowana stała masy atomowej – 1/12 masy spoczynkowej obojętnego atomu nuklidu $^{12}\text{C}$ w stanie podstawowym	$1,660\,538\,73 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$	$7,9 \cdot 10^{-8}$
$\mu_0$	Przenikalność magnetyczna próżni	$4\pi \cdot 10^{-7} = 12,566\,370\,614 \cdot 10^{-7} \text{ Hm}^{-1} (\text{N} \cdot \text{A}^{-2})$	Wartość dokładna
$N_A$	Stała Avogadra	$6,022\,141\,99 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$	$7,9 \cdot 10^{-8}$
$R$	Molowa stała gazowa	$8,314\,472 \text{ Jmol}^{-1} \text{ K}^{-1}$	$1,7 \cdot 10^{-6}$
$R_\infty = \alpha^2 m_e c / 2h$	Stała Rydberga	$10\,973\,731,568\,549 \text{ m}^{-1}$	$7,6 \cdot 10^{-12}$
$R_K = h/e^2 = \mu_0 c / 2\alpha$	Stała von Klitzinga <sup>**)</sup>	$25\,812,807\,572 \, \Omega$	$3,7 \cdot 10^{-9}$
<sup>*)</sup> W pracach metrologicznych dotyczących fizycznych realizacji wolta na podstawie zjawiska Josephsona stosuje się wartość stałej Josephsona przyjętą międzynarodowo $K_{J-90} = 483\,597,9 \text{ GHz V}^{-1}$ jako wartość dokładną. <sup>**)</sup> W pracach metrologicznych dotyczących fizycznych realizacji oma na podstawie zjawiska kwantowego Halla stosuje się wartość stałej von Klitzinga przyjętą międzynarodowo $R_{K-90} = 25\,812,807 \, \Omega$ jako wartość dokładną.			

przedstawionych w czarnych kółkach, dotyczą definicyjnych związków między nimi. Ideą tego obrazu jest pokazanie, w jaki sposób podstawowe jednostki miary SI są powiązane ze światem realnym za pomocą uniwersalnych stałych fizycznych, z natury swojej niezmiennych. Na rys. 1 obszar poza tym kołem reprezentuje świat realny. Względne niepewności przy jednostkach podstawowych oznaczają niepewności standardowe najlepszych i aktualnych ich realizacji praktycznych, natomiast niepewności zaznaczone przy stałych fizycznych, reprezentowane przez białe prostokąty i kwadraty, charakteryzują ich aktualną „znajomość” (wg CODATA, 1998). Powiązania ze „światem zewnętrznym”, zobrazowane za pomocą szarych prostokątów, odzwierciedlają nieznaną nieznajomość dotyczącą niestabilności długoczasowej wzorca kilograma oraz jej konsekwencji w praktycznych realizacjach definicji ampera, mola i kandeli.



**Rys. 1.** Sieć powiązań między podstawowymi jednostkami miar układu SI a niektórymi podstawowymi stałymi fizycznymi

## Amper

Na rys. 1 można w szczególności wyróżnić trzy linie prowadzące od „s” (sekundy), „m” (metra) oraz „kg” (kilograma) do „A” (ampera), odzwierciedlające związek między nimi w odniesieniu do modelu wynikającego z definicji ampera, która brzmi [2, 3, 16, 21]:

*„amper jest to prąd elektryczny nie zmieniający się, który płynąc w dwóch równoległych prostoliniowych, nieskończenie długich przewodach o przekroju znikomo małym, umieszczonych w próżni w odległości 1 m (metr) od siebie – wywołałby między tymi przewodami siłę  $2 \cdot 10^{-7}$  N (niutona) na każdy metr długości”.*

Pamiętając o podstawowych zależnościach elektrodynamiki [2] można dla takiego umyślnego modelu napisać następujące równanie:

$$\frac{dF}{dl} = \frac{2I^2}{s} 10^{-7} \left[ \frac{\text{N}}{\text{m}} \right], \quad (1)$$

gdzie:  $\frac{dF}{dl}$  – siła Laplace’a  $F$ , przypadająca na jednostkę długości  $l$  przewodu, wyrażona w niutonach na metr [N/m];

$I$  – prąd elektryczny płynący w obu przewodach, wyrażony w amperach [A];

$s$  – odstęp między przewodami, wyrażony w metrach [m].

Jak stąd wynika, jednostkę miary prądu elektrycznego – amper [A] zdefiniowano opierając się na metrze [m], kilogramie [kg] i sekundzie [s], ponieważ  $1 \text{ niuton [N]} = 1 \text{ m} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$ . Jednostka miary amper jest więc jednostką zależną [20]. Definicja tej jednostki jest oparta na modelu idealnym (układ nieskończenie długich i nieskończenie cienkich przewodów), a zatem nie może służyć jako „przepis” do fizycznej realizacji (odtworzenia) jednostki miary prądu elektrycznego.

W praktyce absolutne odtworzenie jednostki prądu (ampera) realizuje się za pomocą wagi prądowej, która jest oparta na pomiarze siły wzajemnego oddziaływania elektrodynamicznego cewek z prądem (sposób zbliżony, nawiązujący do definicji ampera przyjętej w układzie SI). Pomiar sprowadza się do pomiaru masy, długości i wykorzystania przyjętej wartości przenikalności magnetycznej  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ [N/A}^2 = \text{H/m]}$  (tabl. 1). Względna niepewność wyniku takiego pomiaru wynosi w najlepszym przypadku około  $4 \cdot 10^{-6}$ . Mniejszą niepewność uzyskuje się wykorzystując prawo Ohma, tzn. stosując wagę elektrostatyczną do wyznaczenia napięcia i kondensator Thompsona-Lamparda [3] do wyznaczenia przyrostu pojemności za pomocą pomiaru przesunięcia (długości). Napięcie wyznacza się z następującego związku [2, 3]:

$$F = \frac{1}{2} \frac{\delta C}{\delta x} U^2, \quad (2)$$

gdzie:  $F$  – siła, wyrażona w niutonach, wywarta na okładki kondensatora, do których jest przyłożone napięcie  $U$  wyrażone w voltach;  
 $\delta x$  – przesunięcie, wyrażone w metrach, między okładkami kondensatora wywołane działaniem siły  $F$ ;  
 $\delta C$  – zmiana pojemności, wyrażona w faradach, wywołana przesunięciem  $\delta x$ .

Za pomocą kondensatora Thompsona-Lamparda można zrealizować absolutny wzorzec rezystancji, natomiast realizując volt i om można, stosując prawo Ohma, zrealizować ampera. Względna niepewność takiej realizacji wynosi około  $4 \cdot 10^{-7}$ .

Jednakże odtwarzalność laboratoryjnych wzorców odniesienia volta i oma, opartych na zjawiskach odpowiednio Josephsona i Halla, jest o trzy rzędy lepsza w przypadku napięcia i dwa rzędy lepsza w przypadku oporu niż przy wyżej przytoczonych pomiarach absolutnych. Z tego też powodu „punktami wyjścia” do fizycznej realizacji jednostek miar wielkości elektrycznych są dwa zjawiska fizyczne, a mianowicie zjawisko – efekt Josephsona w odniesieniu do napięcia elektrycznego (siły elektromotorycznej) i zjawisko – efekt kwantowy Halla w odniesieniu do rezystancji [13, 18].

Stała Josephsona  $K_J = 2e/h$  (tabl. 1) stanowi różnicę potencjałów, wyrażoną w voltach, odpowiadającą jednemu stopniowi napięciowemu  $\Delta U = K_J \cdot f$  charakterystyki napięciowo-prądowej złącza Josephsona, które znajduje się w polu elektromagnetycznym o częstotliwości  $f$ , wyrażonej w hercach, i jest zanurzone w kąpeli ciekłego helu (od 2 do 4 kelwinów).

Podobnie stała von Klitzinga  $R_K = h/e^2$  (tabl. 1) stanowi stosunek różnicy potencjałów Halla – w ramach jednego schodka –  $U_H$  rzędu 100 mV do prądu  $I$  zawartego w przedziale od 10 do 50  $\mu\text{A}$ , przepływającego przez cienką warstwę przewodzącą o grubości rzędu kilku nanometrów (dwuwymiarowy gaz elektronowy), zanurzoną w kąpeli ciekłego helu (o temperaturze kilku kelwinów), na którą oddziałuje stałe pole magnetyczne o indukcji kilku tesla.

## Sekunda i metr

Jako drugi przykład związków między podstawowymi jednostkami miar układu SI a podstawowymi stałymi fizycznymi zostaną rozpatrzone przykłady **sekundy** (jednostki miary czasu) i **metra** (jednostki miary długości).

Od kilkudziesięciu lat niezależna jednostka czasu sekunda opiera się na następującej definicji [8, 10, 21]:

*„sekunda jest to czas równy 9 192 631 770 okresów promieniowania odpowiadającego przejściu między dwoma nadsubtelnymi poziomami stanu podstawowego atomu  $^{133}\text{Cs}$  (cezu 133)”*.

Jak stąd wynika, jednostka czasu sekunda jest oparta na **naturalnym zjawisku** przejścia między dwoma poziomami energetycznymi atomu cezu. Taka definicja określa od razu sposób realizacji praktycznej wzorca, a mianowicie za pomocą mikrofalowego rezonatora cezowego (spektrometru z wiązką cezu) o częstotliwości 9 192 631 770 Hz. Takie wzorce są już od wielu lat wytwarzane na skalę przemysłową i wykazują bardzo dobre właściwości dotyczące dokładności, a mianowicie ich względna niepewność wynosi około  $10^{-12}$ . W kilku największych laboratoriach na świecie są budowane i utrzymywane najdokładniejsze wzorce cezowe o niepewności nawet rzędu  $10^{-14}$ . Ich odtwarzalność można oszacować niepewnością rzędu  $10^{-16}$ . Niestabilność najlepszych wzorców komercyjnych wynosi około  $2 \cdot 10^{-14}$  (średnie jednodobowe odchylenie standardowe Allana [8]).

Warto dodać, że zaznaczone na rys. 1 powiązania między sekundą (s), prędkością światła  $c$  i stałą Plancka ( $h$ ) można wyprowadzić z następujących związków:

- różnica poziomów energetycznych między poziomami  $p$  i  $q$  jest równa [8]  $W_q - W_p = h\nu$  ( $\nu$  – częstotliwość promieniowania, wyrażona w hercach,  $\text{Hz} = \text{s}^{-1}$ ; dla cezu  $\nu = 9\,192\,631\,770\,\text{Hz}$ );
- stała von Klitzinga  $R_K = h/e^2 = \mu_0 c / 2\alpha$  ( $e$  – ładunek elementarny,  $\mu_0$  – przenikalność magnetyczna próżni,  $\alpha$  – stała struktury subtelnej).

Należy podkreślić, że z jednostką czasu – sekundą – wiąże się ściśle zagadnienie dynamicznej **skali czasu**, co określa się popularnie przez pojęcie **rachuby czasu**. Jednym z najważniejszych problemów metrologicznych Międzynarodowego Biura Miar BIPM (*Bureau International des Poids et Mesures*) w Sèvres jest tworzenie, utrzymywanie i rozsiew (dysseminacja) jednostki czasu wraz z sygnałami czasu, za pomocą których przekazuje się skalę czasu o zasięgu światowym. BIPM realizuje Czas Atomowy TAI (*International Atomic Time*), obliczając go na podstawie porównań ze wzorcami wielu laboratoriów metrologicznych na świecie, z zastosowaniem systemu GPS (*Global Positioning System*). Praktycznie największe znaczenie ma tzw. Czas Uniwersalny Skoordynowany UTC (*Coordinated Universal Time*), powstający z czasu TAI przez dokonywanie jego adiustacji tak, aby ta skala była „w fazie” z czasem obrotu Ziemi, co uzyskuje się przez dodawanie lub odejmowanie tzw. **sekund przestępnych**<sup>①</sup>.

Od kilkunastu lat jednostka długości metr opiera się na następującej definicji [16, 21]:

*„metr jest to długość drogi przebytej w próżni przez światło w czasie  $1/299\,792\,458$  sekundy”*.

Jak wynika z tej definicji, metr można zrealizować za pomocą dowolnego (w zasadzie) źródła promieniowania elektromagnetycznego o bardzo dokładnie znanej częstotliwości przy założeniu, że dokładna wartość prędkości rozchodzenia się światła wynosi  $c = 299\,792\,458\,\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  (tabl. 1). Międzynarodowy Komitet Miar CIPM (*Comité International des Poids et Mesures*) przekazał – w celu ułatwienia praktycznej realizacji wzorca długości – zbiór konkretnych przejść atomowych i molekularnych, charakteryzujących się specyficznymi wartościami częstotliwości lub długości fali (zawartej zazwyczaj w przedziale  $0,2 \div 10\,\mu\text{m}$ ), za pomocą których można stabilizować różne

<sup>①</sup> Należy zaznaczyć, że niepewność wzorca cezowego, rozwijającego skalę UTC, rzędu  $3 \cdot 10^{-14}$  osiąga się tylko dla przedziałów czasu co najmniej  $10^7$  sekund (około 3,7 miesiąca), natomiast dla krótszych przedziałów lepszym (stabilniejszym) wzorcem okazuje się maser wodorowy.

promieniowania laserowe. Względna niepewność długości fali tego typu wzorca zawiera się na ogół w przedziale  $10^{-10} \div 10^{-12}$ .

## Kilogram

Jednostką masy jest **kilogram**, którego definicja od 1889 r. brzmi [16, 21]:

*„kilogram jest to masa międzynarodowego wzorca tej jednostki masy przechowywanego w Międzynarodowym Biurze Miar w Sèvres”.*

Jak stąd wynika, dotychczas nie udało się oprzeć definicji i realizacji wzorca masy, opartego na takiej definicji na jakichś związkach ze stałymi fizycznymi, co umożliwiłoby odtwarzanie takiej jednostki w dowolnym czasie i miejscu. Jest to poważna wada układu SI, której do tej pory nie zdołano usunąć. Spójność pomiarową realizuje się przez porównania wzorców za pomocą precyzyjnych wag, umożliwiających wykrywanie względnych różnic mas rzędu  $(2 \div 3) \cdot 10^{-9}$ , jednak znacznym niedostatkim takich metod jest brak możliwości precyzyjnej oceny zmienności czasowej takich wzorców. Z rys. 1 wynika, że ta właściwość wpływa znacznie na niewystarczającą dokładność ampera, mola i kandeli.

Wśród kilku metod, z którymi są związane pewne nadzieje na monitorowanie stabilności kilograma i które mogłyby dać możliwości zmiany definicji kilograma, można wymienić metodę porównania energii elektrycznej z energią mechaniczną z zastosowaniem wagi dźwigniowej [1, 13, 17]. Siła ciężenia (gravitacji) oddziałująca na masę 1 kilograma jest najpierw równoważona siłą Laplace’a, powstała pod wpływem prądu  $I$  płynącego przez cewkę zawieszoną w polu magnetycznym. Następnie tworzy się drugi układ, w którym przemieszcza się cewkę względem linii sił pola magnetycznego ze zmierzoną prędkością  $v$  i wyznacza się różnicę potencjałów  $U$  panującą na końcówkach tej cewki. Można więc napisać następujące równanie na moc, wyrażoną w watach [W]:

$$mgv = IU, \quad (3)$$

gdzie:  $m$  – wyznaczana masa, wyrażona w kilogramach;  
 $g$  – przyspieszenie ziemskie, wyrażone w metrach na kwadrat sekundy;  
 $v$  – prędkość przemieszczania cewki, wyrażona w metrach na sekundę;  
 $I$  – prąd płynący przez cewkę, wyrażony w amperach;  
 $U$  – napięcie panujące na końcówkach cewki, wyrażone w woltach.

Mierząc prąd  $I$  oraz napięcie  $U$  w zależności od różnicy potencjałów na złączu Josephsona (proporcjonalnej do stałej  $2e/h$ ) oraz od rezystancji Halla (proporcjonalnej do stałej  $h/e^2$ ) można wyznaczyć masę  $m$  w zależności od stałej Plancka  $h$ , zakładając, że wyznaczono wartość przyspieszenia ziemskiego  $g$ .

Dokładność, z jaką można przeprowadzić taki eksperyment, jest ograniczona niepewnościami dotyczącymi proporcjonalnościami napięcia Josephsona do stałej  $2e/h$  oraz rezystancji, wyznaczonej na podstawie kwantowego zjawiska Halla, do stałej  $h/e^2$ , a także niepewnością wyznaczenia przyspieszenia  $g$ . Osiąganą dokładność można scharakteryzować niepewnością standardową rzędu kilku razy  $10^{-8}$ .

Ostatnie prace badawcze [17] zawierają obiecujące wyniki związane z wykorzystaniem wspomnianej wagi „watowej” oraz zależności Einsteina ( $E = mc^2$ ) i Plancka ( $E = hv$ ). Istnieje duże prawdopodobieństwo, że wartość wzorcowej masy będzie można wyrazić w zależności od stałej Plancka  $h$  z niepewnością nie przekraczającą wartości  $1 \cdot 10^{-8}$ .

## Uwagi ogólne dotyczące kelwina, mola i kandeli

Dotychczas rozpatrzono pewne związki między podstawowymi jednostkami miar układu SI (konkretnie między amperem, sekundą, metrem i kilogramem) a podstawowymi stałymi fizycznymi. Inaczej przedstawia się to w przypadku pozostałych podstawowych jednostek miar, a mianowicie: kelwina, mola i kandel.

### Kelwin

Kelwin [K] jest jednostką miary temperatury termodynamicznej, określaną następująco [16, 21]:

*„kelwin jest to 1/273,16 temperatury termodynamicznej punktu potrójnego wody”.*

Jednostkę tę stosuje się do wyrażania temperatury termodynamicznej  $T$  oraz do wyrażania różnic temperatury. W praktyce najczęściej stosuje się temperaturę Celsjusza  $t$  [ $^{\circ}\text{C}$ ] =  $T - T_0$ , gdzie  $T_0 = 273,15$  K oznacza temperaturę termodynamiczną, odpowiadającą punktowi krzepnięcia wody. Od 1990 r. obowiązuje tzw. Międzynarodowa Skala Temperatury (MST-90). Ta skala temperatury rozciąga się od 0,65 K aż do najwyższej temperatury, jaką można zmierzyć pirometrem optycznym. Skala ta jest oparta na wielu **punktach stałych** i **metodach interpolacji** między nimi [11, 15, 19]. Jako przykład takich punktów można wymienić:

- punkt krzepnięcia złota: 1064,43 $^{\circ}\text{C}$ ,
- punkt krzepnięcia cynku: 419,58 $^{\circ}\text{C}$ ,
- punkt wrzenia wody: 100 $^{\circ}\text{C}$ ,
- punkt potrójny wody: 0,01 $^{\circ}\text{C}$  itd.

Metody interpolacji między tymi punktami stałymi są oparte na specjalnych czujnikach wzorcowych, np. czujnikach rezystancyjnych, termoelektrycznych, pirometrycznych itd.

Powiązania kelwina (K), molowej stałej gazowej ( $R$ ) i stałej Boltzmanna ( $k$ ) na rys. 1 wynikają z następującego podstawowego równania dla termometru gazowego:

$$pv = nRT = nN_A kT, \quad (4)$$

gdzie:  $p$  – ciśnienie;  
 $v$  – objętość  $n$  moli gazu;  
 $R$  – molowa stała gazowa;  
 $T$  – temperatura termodynamiczna;  
 $N_A$  – stała Avogadra;  
 $k$  – stała Boltzmanna.

### Mol

Mol jest jednostką miary liczności materii, zdefiniowaną następująco [16, 21]:

*„mol jest to liczność materii układu zawierającego liczbę cząstek równą liczbie atomów w masie 0,012 kilograma węgla 12”.*

Przy stosowaniu mola należy określić rodzaj cząsteczek; mogą nimi być: atomy, drobiny (cząsteczki), jony, elektrony, inne cząstki albo określone zespoły takich cząstek [16, 21]. Mol dowolnej substancji



zawiera  $N_A = 6,022\,141\,99 \cdot 10^{23}$  cząstek ( $N_A$  – stała Avogadra, por. tabl. 1). Jednostka ta jest szczególnie często stosowana w analizie dotyczącej reakcji chemicznych. Występuje w takich jednostkach, jak: kg/mol (jednostka masy molowej), m<sup>3</sup>/mol (jednostka objętości molowej) itp. Definicja mola wskazuje, że odpowiednią metodą pomiaru liczności materii danego układu jest ważenie, a więc porównywanie mas, a nie liczenie cząstek składników i produktów określonej reakcji chemicznej.

## Kandela

Kandela jest jednostką miary światłości, zdefiniowaną następująco [16, 21] :

*„kandela jest to światłość źródła emitującego w określonym kierunku promieniowanie monochromatyczne o częstotliwości  $540 \cdot 10^{12}$  herców i o natężeniu promieniowania w tym kierunku równym 1/683 wata na steradian”.*

Jednostkę tę określono w kategoriach czysto fizycznych, przy czym wartości liczbowe wielkości (częstotliwości oraz natężenia promieniowania) zostały dobrane z uwzględnieniem czułości oka ludzkiego i konwencjonalnej aparatury laboratorium fotometrycznego. Jest to jednostka zależna oraz nawiązująca do jednostek pochodnych (mocy i częstotliwości).

## Zakończenie

Rosnące zapotrzebowanie na „rzetelne” wyniki pomiarów zgłaszane przez ludzi nauki i techniki stawia coraz większe wymagania dotyczące aparatury pomiarowej, wzorców miar oraz jednolitego i spójnego systemu jednostek miar. Takim systemem jest właśnie układ SI, którego podstawowe jednostki miar (tzn. ich definicje i praktyczne realizacje) mogą być stosowane w całym świecie, gwarantując odpowiednią dokładność pomiarów – niezależnie od czasu oraz miejsca ich przeprowadzania. Materialną bazę takiego systemu tworzy sieć wielkich ośrodków – instytutów metrologicznych, w których są prowadzone prace badawcze, dotyczące utrzymywania i doskonalenia wzorców miar, zachowania spójności pomiarowej oraz przekazywania (transfer) poprawnych miar na niższe poziomy sieci sprawdzeń aparatury pomiarowej. Odbywa się to przez procesy kalibracji aparatury przeprowadzane przez akredytowane jednostki badawcze.

W ostatnich dekadach XX wieku można wyróżnić dwa trendy w podstawach metrologii, które wynikały z rosnących potrzeb człowieka na coraz dokładniejsze pomiary, a mianowicie: ścisłe powiązanie wzorców odtwarzających jednostki miar ze stałymi fizycznymi oraz ujednolicenie podstawowych pojęć dotyczących niepewności wyników pomiaru i ich praktycznego stosowania [4, 5, 7].

## Bibliografia

- [1] Comité Consultatif pour la Masse et les Grandeurs Apparentées, rapport de la 5<sup>e</sup> session. Sèvres, BIPM, 1993
- [2] Dudziewicz J.: *Podstawy elektromagnetyzmu*. Warszawa, WNT, 1972
- [3] Dudziewicz J. i in.: *Etalony i precyzyjne pomiary wielkości elektrycznych*. Warszawa, WKŁ, 1982
- [4] EAL-R2: *Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration*. Publication Reference of the European Cooperation for Accreditation of Laboratories, 1997
- [5] EAL-R2-S1, Supplement 1 to EAL-R2: *Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration. Examples*. Publication Reference of the European Cooperation for Accreditation of Laboratories, 1997



- [6] *Internationally Recommended Values of the Fundamental Physical Constants*. 1998, <http://www.physics.nist.gov>
- [7] ISO: *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*. 1992
- [8] Kartaschoff P.: *Częstotliwość i czas*. Warszawa, WKŁ, 1985
- [9] Kind D., Quinn T.J.: *Metrology: Quo Vadis*. Physics Today, August 1998, s. 15–17
- [10] *Liens entre les unités de base du SI et les constantes fondamentales et atomiques*. Sèvres, BIPM, 31 sierpnia 2000, [http://www.bipm.fr/fra/3\\_SI/si\\_fig.html](http://www.bipm.fr/fra/3_SI/si_fig.html)
- [11] Michalski L., Eckersdorf K.: *Pomiary temperatury*. Warszawa, WNT, 1986
- [12] Mohr P.J., Taylor B.N.: *CODATA Recommended Values of the Fundamental Physical Constants: 1998*. Journal of Physical and Chemical Reference Data, 1999, vol. 28, no. 6
- [13] Quinn T.J.: *Base Units of the Système International d'Unités, their Accuracy, Dissemination and International Traceability*. Metrologia, 1995, nr 31, s. 515–527
- [14] Suffczyński M.: *Podstawowe stałe fizyczne*. Referat szkoleniowy przygotowany dla pracowników Instytutu Łączności. Warszawa, 1989
- [15] *Supplementary Information for the International Temperature Scale of 1990*. Sèvres, BIPM, 1990
- [16] *Le Système international d'unités*. Sèvres, BIPM, 1998 (7 éd.)
- [17] Taylor B.N., Mohr P.J.: *On the redefinition of the kilogram*. Metrologia, 1999, nr 36, s. 63–64
- [18] Taylor B.N., Witt T.J.: *New International Electrical Reference Standards Based on the Josephson and Quantum Hall Effects*. Metrologia, 1989, nr 26, s. 47–62
- [19] *Techniques for Approximating the International Temperature Scale of 1990*. Sèvres, BIPM, 1990
- [20] Tuninsky V.S.: *Unit system based on fundamental constants*. Metrologia, 1999, nr 36, s. 9–14
- [21] Zarządzenie nr 4 Prezesa Głównego Urzędu Miar z dnia 17 stycznia 1994 r. w sprawie ustalenia nazw, definicji i oznaczeń legalnych jednostek miar. Dziennik Urzędowy Miar i Probiernictwa, 1994, nr 2

## Jerzy Dudziewicz



Prof. nzw. dr inż. Jerzy Dudziewicz (1921) – absolwent Politechniki Warszawskiej (1948); nauczyciel akademicki w Politechnice Warszawskiej, Wieczorowej Szkole Inżynierskiej i Akademii Górniczo-Hutniczej (1950–1984); pracownik Państwowego Instytutu Telekomunikacyjnego oraz biur konstrukcyjnych wielu zakładów wytwórczych sprzętu telekomunikacyjnego (1945–1956), długoletni pracownik naukowy i kierownik Centralnej Izby Pomiarów Telekomunikacyjnych w Instytucie Łączności w Warszawie (od 1956); autor oraz tłumacz wielu książek i artykułów; zainteresowania naukowe: dyscypliny podstawowe elektryki i telekomunikacji, metrologia elektryczna, miernictwo telekomunikacyjne.  
e-mail: JDudzi@astercity.net